

Обжатия при нанесении оребрения не превышают 20 %, ширина полосы 70 мм, материал полосы – сталь 08, сталь 10. Поэтому в целях обеспечения минимальных затрат на реконструкцию оборудования и изменение технологии предлагается установить дополнительный элемент конструкции (проставку) между подушками рабочего и опорного валков. Исключение при этом опорных валков от восприятия вертикального усилия прокатки, как показывает предварительная оценка, позволит обеспечить необходимое качество получаемых оребренных полос при сохранении работоспособности остальных элементов конструкции рабочей клетки.

Список литературы

1. Чиллеры Саньо [Электронный ресурс]. URL: <http://panasonic.net/sanyo/index.html> (дата обращения 18.09.2014).
2. Разработка технологии и оборудования для изготовления труб с внутренним оребрением [Текст] / В. С. Паршин, И. И. Некрасов, А. П. Карамышев и С. М. Газман // Сталь. 1994. № 4. С. 51–53.

УДК 621.313.333

Сафин Н. Р., Прахт В. А., Дмитриевский В. А., Дмитриевский А. А., Смольянов И. А.
Уральский федеральный университет,
emf2010@mail.ru

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ТОКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ ВЕКТОРОВ ПАРКА И ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА В ЦЕЛЯХ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Асинхронные двигатели (АД) являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения. Авторы ряда работ отмечают, что износ подшипников является причиной около 40 % выхода из строя АД [1; 2]. В литературе описывают различные методы токовой диагностики. Ряд авторов [2] отмечают, что дефекты подшипников качения сложно обнаружить по току АД. Одной из причин является наличие доминирующей составляющей тока с частотой сети, превышающей в несколько раз составляющие, вызванные дефектами определенного рода. В других работах [3; 4] имеются сведения, подтверждающие возможность токовой диагностики дефектов подшипника.

Для рассмотрения вопроса о возможности идентификации повреждений подшипников по току статора были проведены испытания АД при работе с различными подшипниками и исследованы полученные данные.

Впервые метод векторов Парка для диагностики различных неисправностей АД, таких как нарушение изоляции обмотки статора, эксцентриситет воздушного зазора, обрыв стержней ротора и т. д., были проанализированы А. J. Marques Cardoso и Е. S. Saraiva в 1993 г. [3]. Приведем описание алгоритма токовой диагностики на основе метода Парка. В первую очередь производят

запись токов в каждой фазе АД. Далее, по фазным токам вычисляют вектор Парка в разные моменты времени и его модуль [3–4]:

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c. \quad (1)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c. \quad (2)$$

$$PI = |i_d + j \cdot i_q|^2 = \sqrt{(i_d t)^2 + (i_q t)^2}. \quad (3)$$

Длина вектора Парка подвергается фурье-преобразованию.

В спектре длин векторов Парка частоты, определяющие неисправности подшипников, выражаются следующим соотношением [4]:

$$f_{EPVA} = k \cdot f_{i,o}, \quad (4)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ (целые числа); $f_{i,o}$ – одна из частот колебаний подшипников, которые могут быть вычислены по следующим формулам, Гц [4]:

– при дефекте во внутренней обойме

$$f_i = \frac{n}{2} \cdot f_P \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right), \quad (5)$$

– при дефекте во внешней обойме

$$f_o = \frac{n}{2} \cdot f_P \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right), \quad (6)$$

где $n = 8$ – число тел качений подшипника, шт.; $f_{Pu} = 45,75$ – частота вращения ротора в номинальном режиме, Гц; $d = 7,94$ – диаметр тела качения, мм; $D = 33,5$ – диаметр делительной окружности, мм; α – номинальный угол контакта подшипника (условно 0°).

Рассчитанные числовые значения характерных частот с использованием формул (5)–(6) занесены ниже в таблицу.

Числовые значения частот определяющих дефект подшипника

Вид дефекта подшипника	Частоты f_i и f_o , Гц	Частоты f_{EPVA} , Гц		
		$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
Во внешней обойме	139,6	139,6	279,2	418,8
Во внутренней обойме	226,4	226,4	452,8	679,2

В качестве испытуемого АД был использован АИР 71А2У2 (0,75 кВт; 2820 об/мин), в котором используются подшипники марки 6204 (рис. 1, а, б). Испытания проводились (рис. 1, а и б): с исправным подшипником и с подшипниками, имеющими отверстия по внешним обоймам 4 мм (поврежденный № 1) и 6 мм (поврежденный № 2). В двух последних случаях также имелись небольшие выемки во внутренних обоймах подшипников. Данные способы искус-

ственного получения дефектов для анализа режимов работы АД с поврежденными подшипниками отмечаются в работе [6; 8].

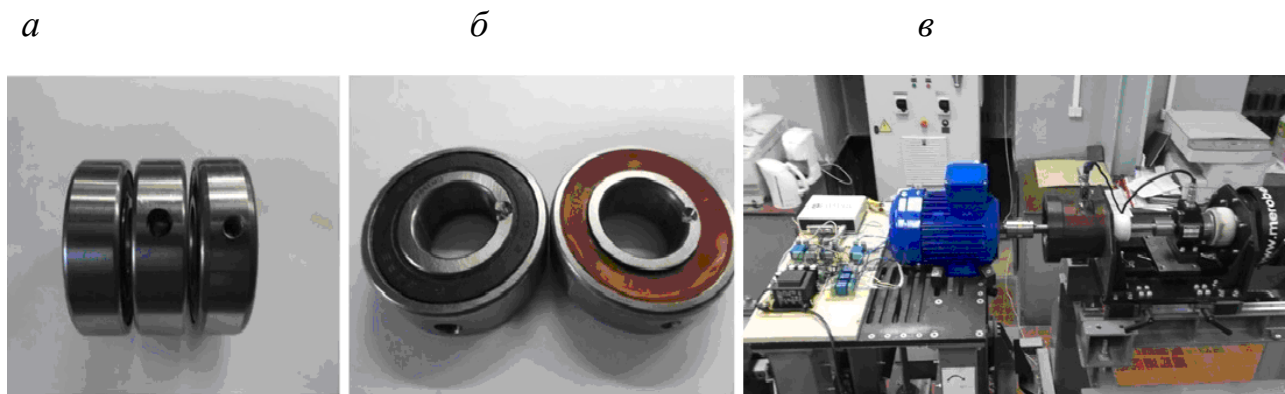


Рис. 1. Подшипники и испытательный стенд:
а – исправный, поврежденные № 2 и 1;
б – поврежденные подшипники вид сбоку, *в* – испытательный стенд

Испытания проводились на стенде (рис. 1, *в*), при этом нагрузочный момент создавался электромагнитным порошковым тормозом «MetrobelFAT 350» 35 Н·м, 3000 об/мин. Для измерений использовались: датчик момента TRD-3K (3 кгс·м), датчик частоты вращения МР-981. Для сопоставимости результатов значения нагрузочных номинальных моментов задавались равными ($M_H = 2,5$ Н·м). Запись значений токов и напряжений на компьютер выполнялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (USB3000) с частотой дискретизации 3 кГц и измерительной платы с тремя датчиками токов LEMHX 02-P и тремя датчиками напряжений LV25-PSP5. Далее мгновенные значения токов обрабатывались в пакете Matlab для построения спектрограмм.

Рассмотрим кривые Лиссажу векторов токов Парка (рис. 2, *а*, *б*, *в*), построенные с помощью формул (1)–(2).

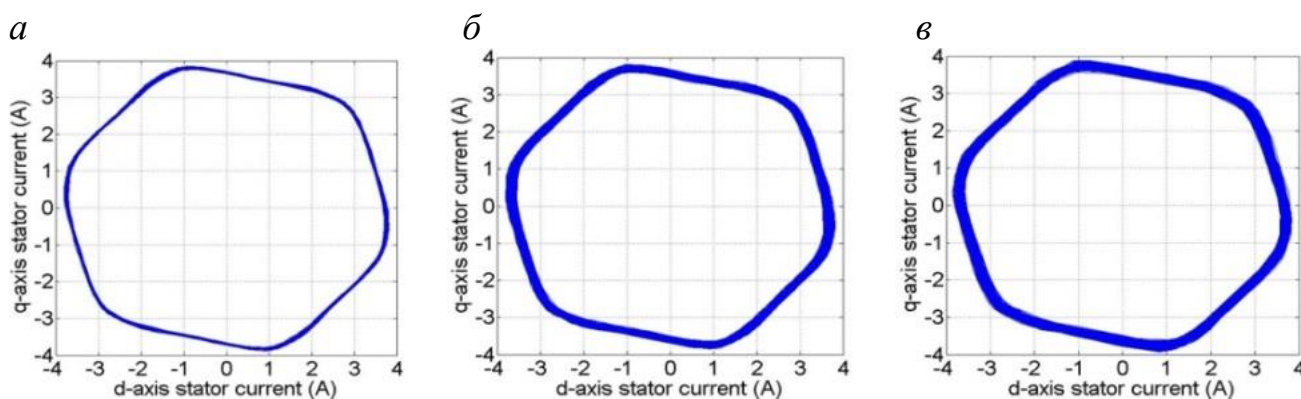


Рис. 2. Токи статора АД по кривым Лиссажу:
а – при работе с исправным подшипником; *б* – с поврежденным подшипником № 1;
в – с поврежденным подшипником № 2

Отметим, что при работе АД с поврежденными подшипниками толщина кривых Лиссажу получилась шире, чем при испытаниях с исправным подшипни-

ком. При этом надо учитывать, что утолщение кривых Лиссажу мало говорит о типе неисправности и его местонахождении. Так как существуют следующие факторы: неполная синусоидальность напряжения питания – коэффициент нелинейного искажения в данной работе был равен $K_U = 1,95 \%$, наличие изначального уровня эксцентриситета (до 10 % допуск) заводом-изготовителем и т.д. В связи с этим для точного определения наличия неисправности подшипников выполняют построения спектрограмм (рис. 3).

Рассмотрим спектрограмму токов статора при работе с исправным и неисправным подшипником № 1 (рис. 3), на которой отмечены характерные частоты, соответствующие определенным повреждениям.

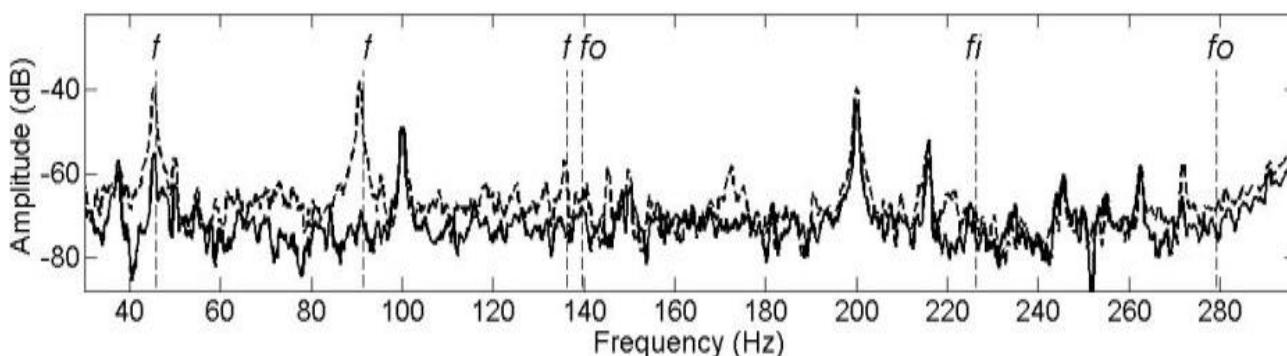


Рис. 3. Спектрограмма токов АД при работе с исправным (сплошная линия) и неисправным подшипником № 1 (штрихпунктирная линия)

В исследуемом диапазоне выделяют: две частоты (f_o), определяющие дефект во внешней обойме подшипника, одну частоту (f_i), которая должна указывать на наличие дефекта во внутренней обойме подшипника. Можно заключить (см. рис. 3), что среди частот (f_i) и (f_o) определяющих дефект подшипника, выделяется частота (f_o), равная 139,6 Гц. Вместе с тем на приведенных спектрограммах отмечены характерные частоты, кратные частоте f вращения ротора АД, на уровнях 45,75 Гц, 91,5 Гц и 137,25 Гц, возникающие при работе с неисправным подшипником. Как было приведено ранее, частота вращения ротора f_p при номинальном режиме равнялась 45,75 Гц.

Ряд авторов также отмечают [6; 7], что для нестационарных сигналов, которые чаще всего состоят из кратковременных высокочастотных и длительных низкочастотных компонентов, целесообразно применять вейвлет анализ, при котором обеспечиваются узкие окна для высоких частот и широкие окна для низких частот.

Нами был использован этот метод. Мгновенные значения токов, полученные на стенде (см. рис. 1, в), обрабатывались в пакете Matlab для проведения вейвлет анализа.

В качестве материнского вейвлета, как одного из используемых [6; 8], был применен вейвлет Добеши. Рассмотрим приведенные на рис. 4 и 5 графики.

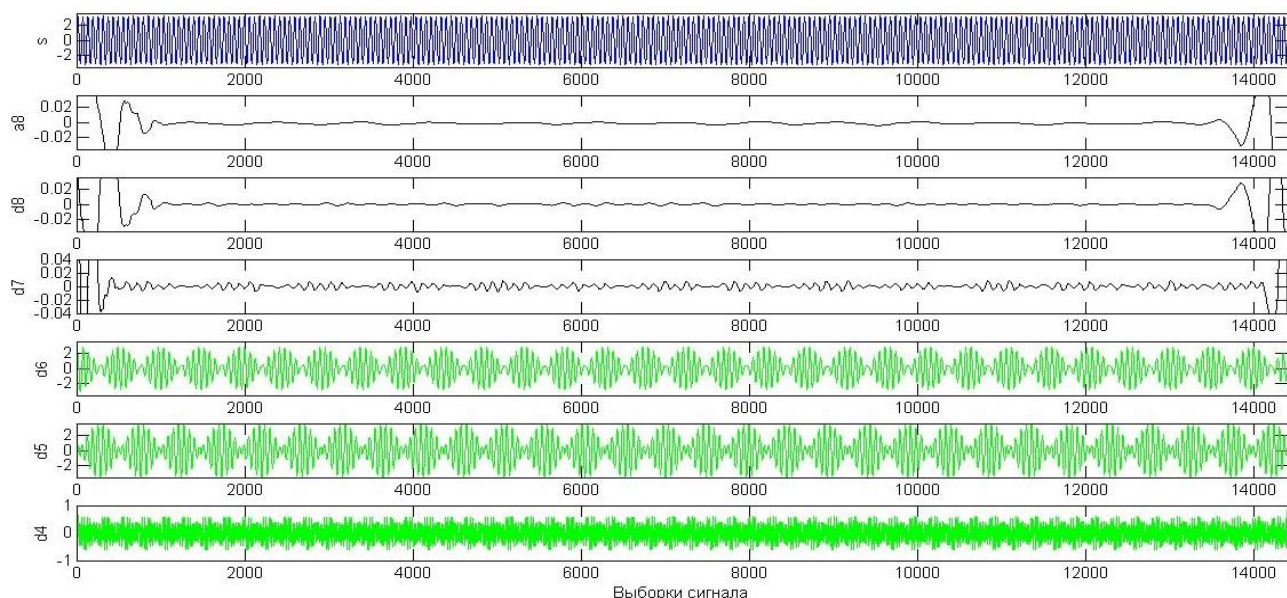


Рис. 4. Разложение вейвлета Добеши № 4 до 8-го уровня – тока статора при работе с исправным подшипником

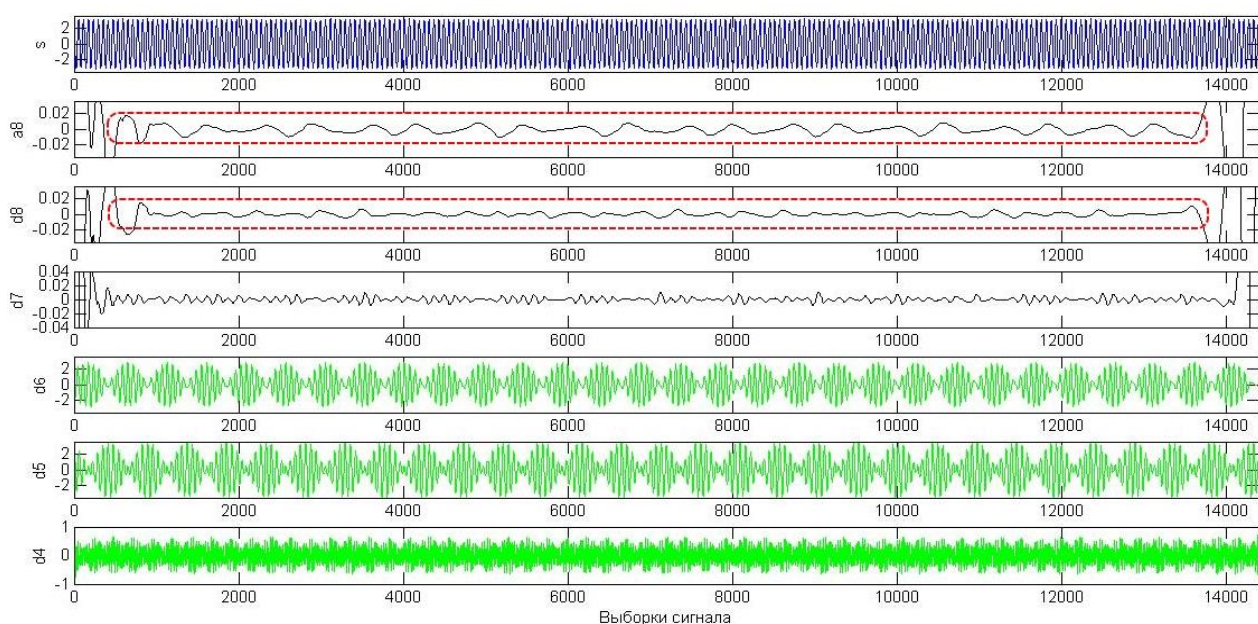


Рис. 5. Разложение вейвлета Добеши № 4 до 8-го уровня – тока статора при работе с поврежденным подшипником № 1

Сопоставив выходные графики коэффициентов аппроксимации a_8 и детализации d_8 , заметим, что при работе АД с неисправным подшипником № 1 (см. рис. 5) имеется увеличение уровня амплитуд коэффициентов a_8 и d_8 .

При повторных испытаниях с неисправным подшипником № 2 полученные выходные данные вейвлет-коэффициентов получились подобными вышеприведенному графику (см. рис. 5). Следовательно, при работах АД с неисправными подшипниками можно наблюдать рост амплитудных колебаний и увеличение определенных вейвлет-коэффициентов.

Таким образом, одной из основополагающих идей вейвлет-представления сигналов является разбивка приближения к сигналу на две составляющие – аппроксимирующую и детализирующую, с последующим их дроблением с целью изменить уровень декомпозиции сигнала.

В нашем случае значение коэффициента полезного действия (КПД) для АД с исправным подшипником составило $\eta_1 = 0,625$. При испытаниях с поврежденными подшипниками значения составили $\eta_2 = 0,61$ (с поврежденным подшипником № 1) и $\eta_3 = 0,62$ (с поврежденным подшипником № 2). Следовательно, в результате повреждения подшипника КПД электродвигателя снизился на 2,4 и 1,6 % соответственно для двух описанных выше случаев. Как правило, основными причинами выхода из строя подшипников могут быть запыленность воздуха, неблагоприятные климатические условия, частые перегрузки, ненадлежащий монтаж, агрессивная среда и т.д.

Можно отметить, что дефекты подшипников по току статора можно обнаружить методом векторов Парка, для детального мониторинга и диагностики требуется построение спектрограмм. Необходимость заблаговременного выявления и мониторинга неисправностей АД напрямую связана с обеспечением безопасной и экономичной эксплуатации промышленных установок и технологических комплексов.

Токовая диагностика АД, с помощью которой можно заблаговременно выявлять неисправности, в частности неисправности подшипников, дает возможности заранее планировать ремонтно-технологические работы, снизить перерасход электроэнергии, также улучшить технологию и повысить рентабельность производства.

Список литературы

1. Jafar Zarei, Javad Poshtan. An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection // Tribology International. 2009. Vol. 42. P. 213–219.
2. Onel I. Y., Dalci K. B., Senol I. Detection of outer raceway bearing defects in small induction motors using stator current analysis // Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences. 2005. Vol. 30 (6). P. 713–722.
3. Induction Motors – Modelling and Control // Edited by Prof. Rui Esteves Araújo. Rijeka : InTech. 2012. P. 558 .
4. Jose L. H. Silva A. J., Marques Cardoso. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach // IEEE. 2005. P. 2591–2596.
5. Levent Eren. Bearing damage detection via wavelet packet decomposition of stator current // PhD thesis. 2002. P. 116.
6. DWT analysis of numerical and experimental data for the diagnosis of dynamic eccentricities in induction motors / J. Antonino-Daviu, P. Jover, M. Riera, A. Arkkio, J. Roger-Folch // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. № 21. P. 2575–2589.
7. Ruqiang Yan, Robert X. Gao, Xuefeng Chen. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines : A review with applications // Signal Processing. 2014. № 96. P. 1–15.
8. Discrete Wavelet Transforms-Theory and Applications / Edited by Juuso Olkkonen. Rijeka : InTech, 2011. P. 268.